



**Commentaire de: " Transformation thermodynamics:
cloaking and concentrating heat flux " - Opt. Express
20, 8207 (mars 2012).**

Laurent Krähenbühl, Ruth V. Sabariego, Christophe Geuzaine, Alain Bossavit

► To cite this version:

Laurent Krähenbühl, Ruth V. Sabariego, Christophe Geuzaine, Alain Bossavit. Commentaire de:
" Transformation thermodynamics: cloaking and concentrating heat flux " - Opt. Express 20, 8207
(mars 2012).. 2012. hal-00741585v2

HAL Id: hal-00741585

<https://hal.science/hal-00741585v2>

Preprint submitted on 4 Apr 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Commentaire de :
« Transformation thermodynamics: cloaking and concentrating heat flux »
Opt. Express 20, 8207 (2012) (<http://dx.doi.org/10.1364/OE.20.008207>)

Laurent Krähenbühl^(a), Ruth V. Sabariego^(b), Christophe Geuzaine^(b), Alain Bossavit^(c)

^(a) Université de Lyon et Laboratoire Ampère – CNRS UMR5005 (Laurent.Krahenbuhl@ec-lyon.fr)

^(b) Université de Liège – ACE (r.sabariego@ulg.ac.be ; cgeuzaine@ulg.ac.be)

^(c) Laboratoire de Génie Électrique de Paris – CNRS UMR8507 (Alain.Bossavit@supelec.fr)

Version du 03/04/2013 - 11:31

Avertissement aux lecteurs.

Version 1 du 14/10/2012

Les auteurs de l'article Opt. Express 20, 8207 (2012) [1], publié fin mars 2012, ont été informés en juin 2012 de nos critiques, aussi bien par écrit que lors de deux discussions directes. Ces critiques remettent en cause les bases mêmes du concept qu'ils ont développé. Ils maintiennent cependant leurs conclusions, sans pour autant apporter d'argument scientifique pour les soutenir, ou pour nous contredire.

La présente contribution doit permettre à la communauté scientifique, en particulier thermicienne, de valider l'un ou l'autre de ces points de vue.

Version 2 du 03/04/2013 (le texte principal de ce commentaire, à partir de son Résumé, est inchangé).

Les auteurs de l'article contesté d'Optics Express ont répondu à notre commentaire le 12/12/2012 [voir [hal-00764274 - version 1](#)]. Il s'agit d'un texte très bref, ne contenant aucune considération scientifique nouvelle susceptible d'éclaircir les points soulevés dans notre commentaire, dont nous soulignons qu'il se réfère à une quinzaine de passages exactement identifiés de l'article d'origine.

La rédaction de cette réponse est de plus scientifiquement ambiguë, il semble dès lors utile d'en expliciter la signification précise (points 1. et 2.1 ci-dessous). Enfin, cette réponse étant en partie fondée sur une expérience numérique de l'article d'origine dont nous avons déjà montré qu'elle n'a pas été réalisée correctement (§5 de notre commentaire), nous ajoutons au point 2.2 quelques résultats qui illustrent cela, en espérant ainsi convaincre les auteurs.

1/ Les auteurs reconnaissent implicitement qu'ils se sont trompés quant aux propriétés de protection thermique qu'ils attribuaient jusqu'ici à leur structure.

C'était en effet la principale critique que nous formulions, et nous apprécions que notre commentaire les ait conduits à changer d'avis. Dont acte.

Notons cependant que toutes les applications potentielles citées par les auteurs (de même que la seule application proposée dans l'article [R. Schittny et al.] mis en référence de la réponse) étaient liées à cette propriété de protection thermique : il leur faudrait donc, si possible, proposer d'autres applications, compatibles avec le point 2.1 ci-dessous.

2/ Les auteurs décrivent maintenant leur travail de la manière suivante :

« L'article d'Optics Express (...) montre analytiquement comment rendre les isothermes en sortie d'un système contenant un objet, identiques aux isothermes qui auraient existé en l'absence de l'objet. On retrouve ainsi le concept d'invisibilité (...). Une illustration numérique est donnée à titre d'exemple (...) qui permet d'obtenir le gradient requis pour la reconstruction des isothermes en sortie du système. »

2.1. La première phrase est particulièrement ambiguë : de quel objet parle-t-on ?

En optique, le « concept d'invisibilité » permet l'invisibilité pour un objet *quelconque* placé au centre du dispositif d'invisibilité (souvent appelé « cape »). Même si le travail présenté dans Optics Express est en partie une transposition de ce même concept vers une équation de diffusion en régime transitoire, il faut dire très clairement que ce qui y est montré n'est absolument pas comparable : la théorie permet aux auteurs de construire un objet *particulier* qui a cette propriété d'« invisibilité » thermique en régime transitoire (cet objet est le système multicouche lui-même, sans rien en son centre). Il ne permet pas de rendre thermiquement invisible un objet *quelconque* (et en particulier un objet dont la capacité thermique volumique serait différente de celle du milieu ambiant), par exemple en le plaçant au centre de ce multicouche.

Autrement dit, les auteurs ont construit une cape d'invisibilité pour la conduction thermique en régime transitoire, qui ne fonctionne que si elle est vide, et la théorie avancée ne permet pas de faire plus.

2.2. La dernière phrase (*« Une illustration numérique ... »*) ne correspond pas à la réalité.

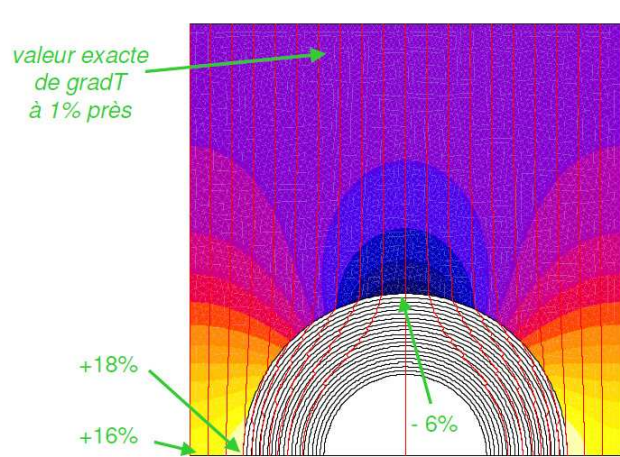
En raison de la normalisation erronée de l'équation de la chaleur qu'ils ont mise en œuvre, qui revient à attribuer la même propriété ρc_p à tous les matériaux (voir le §5 de notre commentaire), les auteurs ne peuvent certainement pas affirmer que l'expérience numérique réalisée au §4.3 de l'article d'Optics Express est une « illustration numérique » de leur théorie du §3.1 : les propriétés thermiques qu'ils attribuent aux différentes couches (dans l'expérience numérique de leur Fig. 4) ne sont en rien reliées à ladite théorie ; notons d'ailleurs que la solution obtenue à l'extérieur du système multicouche n'est pas à gradient uniforme (ce qui est « requis » ; nos calculs montrent que la solution en régime permanent présente une erreur sur le gradient de l'ordre de 18%, cette erreur étant encore pire durant le régime transitoire ; voir aussi nos commentaires en note 21 de notre document original, et la figure ci-dessous). Nous tenons à disposition des auteurs un jeu de valeurs de propriétés plus conformes à leur théorie, et qui donne de meilleurs résultats.

Figure : Gradient de température et lignes isothermes en régime établi pour le dispositif de la Figure 4 d'Optics Express.

Les valeurs attribuées dans l'article d'Optics Express aux propriétés thermiques des vingt couches ne sont pas conformes à la théorie qui y est développée. Le gradient « requis » à l'extérieur de la « cape » est constant, les valeurs obtenues s'en écartent jusqu'à 18% (et plus encore durant le transitoire thermique).

En prenant des valeurs conformes à cette théorie, on peut ramener l'erreur en-dessous des 5%. Pour faire mieux, il faut multiplier le nombre des couches, ou passer à un matériau à propriétés continument variable.

Noter que l'ajout d'un « objet » au centre de ce dispositif (dès lors qu'il modifie la capacité thermique totale) conduit obligatoirement à une modification du régime thermique transitoire (le régime établi étant peu ou pas modifié, car il ne dépend que des conductivités).



Dans la suite de ce texte, rien n'a été modifié par rapport à la version 1 du 14/10/2012.

Résumé – Optics Express a publié en mars 2012 un article concernant la transposition au domaine de la thermique (équation de la chaleur) du principe de la cape d'invisibilité optique. Les auteurs y présentent en particulier la théorie bidimensionnelle d'un métamatériau en forme de disque, aux propriétés thermiques remarquables en conduction pure (équation de la chaleur), dont ils proposent ensuite une réalisation approchée, formée de dix couches d'isolant thermique séparées par dix couches de conducteurs de conductivités thermiques décroissant avec le rayon.

Nous donnons ici les résultats d'une expérience numérique complémentaire, consistant à comparer le comportement thermique de la réalisation proposée de ce métamatériau à celui d'une configuration tout à fait banale à deux couches.

Cette expérience montre clairement que les auteurs sont allés trop loin dans l'interprétation pratique de leurs résultats théoriques. En particulier, et conformément aux résultats habituels de la thermodynamique, la réalisation approchée qu'ils proposent pour leur matériau théorique (tout comme plus généralement toute autre réalisation, aussi soignée soit-elle), ne permet en aucun cas de protéger un objet de la chaleur mieux que ne le fait un simple isolant d'épaisseur équivalente. L'isolation qu'ils obtiennent est même moins bonne, ce qui enlève tout intérêt pratique à leur travail, qui contient par ailleurs d'autres erreurs.

Introduction.

Ce travail des auteurs¹ a également fait l'objet en Europe d'entretiens publiés par de nombreux journaux ou média « grand public » (voir Références [2] à [10] données à titre d'exemples, mais il y en a beaucoup d'autres), qui explicitent la publication [1]. Les auteurs annoncent que ce concept nouveau permet de protéger un objet de la chaleur², de manière ajustable³, ou de guider les flux de chaleur, avec une efficacité exceptionnelle promettant de nombreuses applications spectaculaires⁴. Si cela était avéré, c'est toute la communauté thermicienne mondiale, voire toute la physique, qui serait bouleversée.

Nous pensons pour notre part, en reprenant leurs propres mots⁵, qu'il ne s'agit bien, cette fois-ci, que d'un rêve d'opticiens. Pour le démontrer nous proposons dans un premier temps aux paragraphes 1 à 4 une expérience numérique complémentaire, qui montre que la structure proposée par les auteurs n'exhibe en réalité *aucune* propriété particulière de « protection thermique ». Pour nous placer dans les mêmes conditions que les auteurs, nous « normalisons » à leur manière l'équation de la chaleur, même si cela est incorrect, comme nous l'expliquons au §5. Enfin, nous donnons au §6 et dans la conclusion notre analyse de l'origine des erreurs - qui sont essentiellement des erreurs d'interprétation - commises par les auteurs de [1].

1/ Les deux structures qui seront comparées.

L'expérience numérique complémentaire⁶ que nous proposons consiste à comparer le comportement thermique de la réalisation que les auteurs proposent pour leur métamatériau ([1], Fig. 4), à celui d'une configuration tout à fait banale, où les 19 couches externes sont remplacées par une seule couche d'isolant uniforme, avec la même épaisseur totale, seule la couche conductrice de plus haute conductivité thermique (au plus petit rayon) étant conservée, afin d'uniformiser la température de la zone centrale.

Notre Fig. 1 ci-dessous présente les deux structures qui seront comparées. A gauche (Fig. 1.a), on retrouve la structure à vingt couches proposées par les auteurs. A droite (Fig. 1.b) la structure à deux couches qui servira de comparaison. Les conditions aux limites appliquées sont identiques : le flux de chaleur est nul sur les deux frontières horizontales haute et basse, la température est imposée sur les frontières gauche et droite⁷. L'expérience consiste à partir de conditions initiales isothermes (température T normalisée nulle dans tout le dispositif) à $t < 0$, puis à imposer $T = 1$ pour $t > 0$ sur la frontière de gauche.

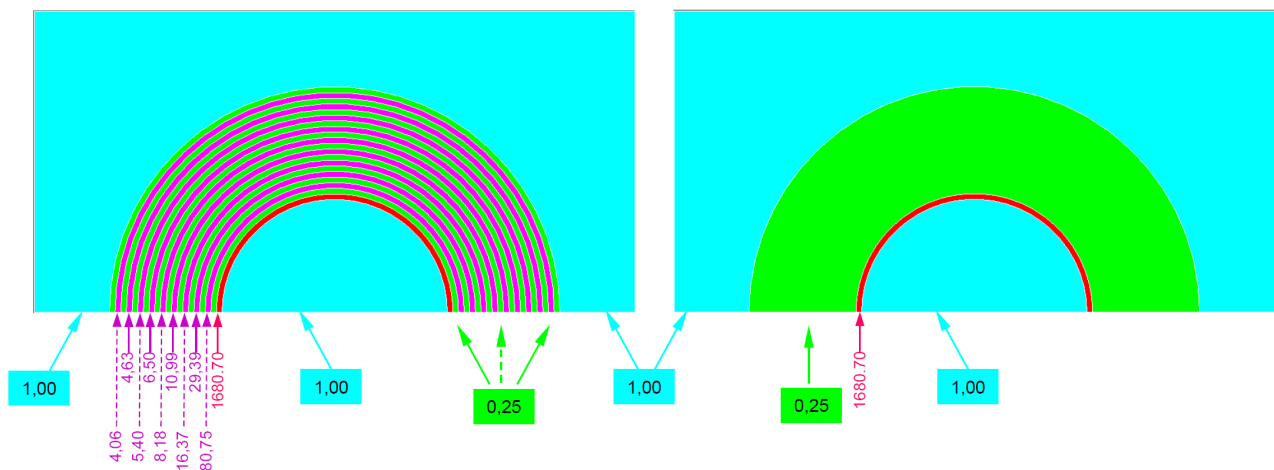


Fig. 1 : les deux dispositifs comparés dans ce commentaire.

Les valeurs indiquées correspondent aux diffusivités [$10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$] (cf. §5).

Les dimensions géométriques sont celles des auteurs : les rayons du disque sont 0,15 et 0,30mm.

(a) : système à vingt couches proposé par les auteurs — b) : simple bicouche

les diffusivités sont celles des auteurs

on a attribué aux 19 couches externe la plus faible diffusivité utilisée dans la structure (a)

- 1 Dans ce texte, « les auteurs » sont les auteurs de la publication [1] : S. Guenneau, C. Amra et D. Veynante.
- 2 [1], Abstract : « We apply this new concept to an invisibility cloak in order to thermally protect a region » ; §1 : « We finally propose a multilayered device working as a thermic protection » ; §3.1 : « However, the invisibility region (inner disc) displays a specific protection for heat » ; « Such a cloak could be used in thermal protection. » ; §4.1 : « the thermal protection is preserved. » ; §5 : « We have proposed to design an invisibility cloak, which reduces the temperature inside an arbitrary region ».
- 3 [1], §5 : « We stress that the efficiency of the thermal protection with the invisibility cloak depends upon the position of its center »
- 4 [1], §3.2 : « Such a concentrator could be used to focus heat in a tiny region, what might have potential applications in photovoltaics » ; [2] : « Researchers in France have shown how to isolate or "cloak" objects from sources of heat – a breakthrough that could help cool down electronic devices and thereby pave the way towards more powerful computers... » ; [3] : « "We can design a cloak so that heat diffuses around an invisibility region, which is then protected from heat," Dr Guenneau explained » ; [4] : « Par exemple, une main recouverte du revêtement protecteur proposé par l'Institut Fresnel (CNRS et université Aix-Marseille) et l'École centrale de Paris s'approcherait d'un chauffage sans ressentir le moindre flux de chaleur ou, en termes plus savants, de gradient de température. De quoi éviter la surchauffe des composants électroniques miniaturisés, et donc leur perte de performances. » ; « le front de chaleur contourne l'objet à protéger sans y pénétrer » ; [5] : « on peut imposer un chemin à la chaleur pour la concentrer, la détourner » ; etc.
- 5 Nous faisons ici allusion au titre d'une journée d'optique organisée à Paris le 23 mai 2012 : « L'invisibilité : rêve ou réalité ? ». L'invisibilité est un sujet à la mode en optique, et 2 des auteurs de [1] en sont des spécialistes reconnus. Voir <http://www2.cnrs.fr/presse/communiqu2637.htm>.
- 6 De manière à minimiser les risques d'erreur, nos expériences numériques ont été menées deux fois et indépendamment, avec le logiciel commercial Flux® et avec le logiciel sous licence GPL « Getdp ».
- 7 Dans [1] §3.1, les auteurs ont mis une condition de convection à droite, avec des paramètres tels que cela revient à imposer une température nulle.

2/ Résultats.

La solution, que nous avons obtenue par la méthode des éléments finis, est évidemment un flux de chaleur de la gauche vers la droite, avec un phénomène transitoire tendant asymptotiquement vers un régime établi.

Les deux résultats caractéristiques particulièrement soulignés par les auteurs⁸ pour la configuration 1.a sont exactement retrouvés pour la structure 1.b : la zone centrale évolue en température de manière monotone, elle est à chaque instant quasi isotherme ; la température normalisée asymptotique atteinte est dans les deux cas égale à 0,5.

3/ Commentaire.

On voit donc que ces deux caractéristiques de la solution, mises en avant par les auteurs pour confirmer leur interprétation de « protection thermique », peuvent être obtenues de manière beaucoup plus simple que ce qu'ils proposent. En fait, elles ne sont pas du tout liées à la structure multicouche complexe spécifique proposée, ni à une quelconque propriété de protection thermique :

- la quasi-uniformité de la température de la partie centrale est uniquement liée à la *couche conductrice* entourant cette zone, qui a cet effet bien connu en thermique⁹ ;

- la température normalisée asymptotiquement atteinte (0,5) est associée par les auteurs aux propriétés de protection thermique de leur dispositif. C'est une erreur d'interprétation évidente¹⁰ : cette valeur (0,5) est en effet uniquement liée à la *symétrie* du dispositif par rapport à sa médiane verticale.

4/ Résultat comparatif quantitatif complémentaire.

Nous pouvons en plus, à partir de résultats complémentaires tirés des mêmes expériences numériques, comparer *objectivement* les performances de « protection thermique » obtenues dans les deux cas étudiés.

Les auteurs ne définissent pas dans l'article [1] ce qu'ils appellent « protection thermique » (alors même que c'est l'un des sujets principaux de leur texte) ; nous proposons ici une définition *relative*, consistant à comparer les *dynamiques* de montée en température de la zone centrale : plus le temps de montée en température sera grand, meilleure sera la protection. Le résultat est présenté en Figure 2 :

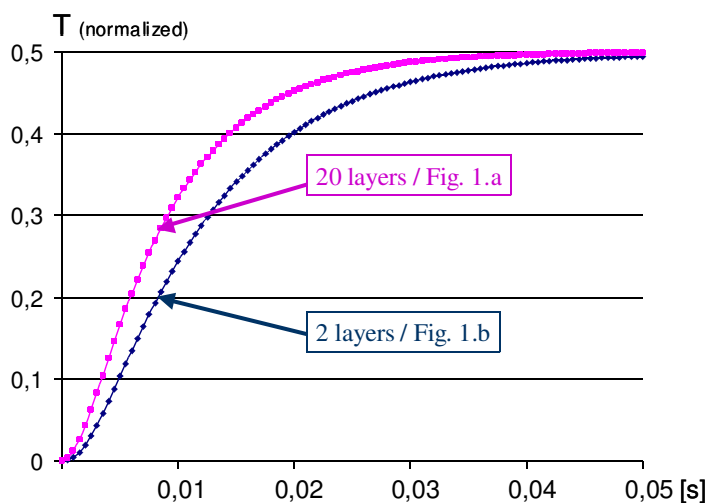


Fig. 2 : comparaison des dynamiques de montée en température
au centre des deux dispositifs de la Fig. 1.

La montée en température obtenue avec le multicouche des auteurs est nettement plus rapide qu'avec la solution banale à deux couches. Cela est conforme à un calcul analytique approximatif de la diffusivité¹¹ radiale équivalente obtenue pour les deux situations : les vingt couches de la Fig. 1.a donnent $0,486E-5$,

⁸ [1] §4.3 : « Snapshots of heat distribution at $t = 0.01s$ (a) and $t = 0.05s$ (b) show that normalized temperature on the left side of the cell is non vanishing inside the inner disc (invisibility region), but it never exceeds a half of the maximum value of normalized temperature (even for $t > 0.05s$). The fact that the temperature inside the inner disc is still a constant for a given time as in Fig. 2, whereas in Fig. 4 the cloak no longer displays singular values of the diffusivity, requires a more sophisticated explanation (...) »

⁹ [1], §3.1. Les auteurs constatent que l'inclusion est isotherme, ce qu'ils semblent attribuer à leur cape : « Moreover, the isovalues of the field showing the diffusion of temperature within the metamaterial cloak clearly demonstrate that temperature inside the coating is smoothly detoured around the invisibility region », puis ils relient (sans autre explication) cette propriété à la protection thermique : « Such a cloak could be used in thermal protection ».

¹⁰ La remarque faite dans leur conclusion par les auteurs ([1], §5 : « We stress that the efficiency of the thermal protection with the invisibility cloak depends upon the position of its center (...) ») est une évidence, voire une forme de naïveté. On la retrouve encore plus explicitement dans [4], qui cite directement l'un des auteurs : « Il faut souligner que l'objet protégé s'échauffe un peu, mais cette température reste constante et toujours au-dessous de la moitié de celle de la source (...) ». La température normalisée asymptotiquement atteinte sera en effet 0,5 si l'inclusion est centrée, plus chaude si elle est plus proche de la source chaude, plus froide dans le cas contraire, c'est là l'expérience acquise par chacun, dès l'enfance...

¹¹ Voir sur cette notion de diffusivité nos remarques au §5 de ce texte.

Pour les calculs analytiques approchés, voir par ex « Conduction thermique » sur Wikipédia : http://fr.wikipedia.org/wiki/Conduction_thermique

contre $0,263E-5$ pour les deux couches de la Fig. 1.b. Le bicouche banal assure donc une bien meilleure protection thermique que le multicouche sophistiqué proposé par les auteurs.

Par rapport à l'isolant bi-couche banal, la « cape » définie par les auteurs a pour effet d'augmenter le flux de chaleur qui contourne la zone soi-disant « protégée », ce qui - sur les représentations graphiques (comme sur [1] Fig. 4.d) - peut laisser croire que *tout* le flux contourne cette zone. Ce n'est qu'une illusion, qui masque le fait que *le flux direct de la source chaude vers cette zone plus froide a lui aussi augmenté*, comme le démontre le résultat présenté sur notre Fig. 2¹².

La réalisation pratique de la cape définie dans [1] ne présente aucune propriété spécifique de « protection thermique », ce qui remet en cause l'essentiel de cet article.

5/ « Diffusivité » et « normalisation » de l'équation de la chaleur ?

L'équation de la chaleur doit toujours être écrite dans une forme qui sépare bien la propriété de conduction thermique (grandeur K qui permet de définir le flux thermique à partir du gradient de la température), de la partie d'inertie thermique (grandeur ρc qui relie la chaleur à la variation de la température), comme le font d'ailleurs les auteurs (cf. leur Eq. 1).

On croit cependant comprendre à la fin du §4.2¹³ qu'ils résolvent le problème de conduction thermique transitoire après avoir « normalisé » l'équation de la chaleur en divisant ses deux membres par ρc , ce qui explique aussi qu'ils ne fournissent comme données des matériaux que la diffusivité $K/(\rho c)$. En procédant ainsi, ils ne garantissent plus la conservation de la bonne quantité physique (le flux de chaleur) aux interfaces entre milieux de propriétés différentes.

Les résultats présentés par les auteurs (et les nôtres dans ce texte), ne sont donc corrects que si ρc vaut 1 partout ; est-ce le cas pour les matériaux du §4.3 de [1], et ceux qui sont « usinés » à Lille¹⁴ ?

6/ Du paradoxe du chauffage sans chaleur, à l'analyse de l'erreur d'interprétation originelle...

Les auteurs expliquent dans la partie théorique de leur texte que la zone centrale est isotherme, mais s'échauffe néanmoins pendant le transitoire thermique¹⁵. C'est aussi ce que donne leur calcul numérique pour le matériau théorique. Ce résultat ne respecte évidemment pas l'équation de la chaleur : pour qu'un point de la zone centrale (de diffusivité et conductivité finies) s'échauffe par conduction, il faut que la divergence du flux de chaleur y soit non nulle, ce qui implique l'existence d'un flux de chaleur, qui n'est pas présent si cette zone est rigoureusement isotherme¹⁶.

La situation théorique imaginée par les auteurs à partir de la méthode utilisée en optique conduit à un paradoxe dont il est difficile de sortir, car d'une part il n'y a aucun flux de chaleur qui traverse le bord interne du disque¹⁷ (donc la zone centrale ne peut s'échauffer, même si cette évidence échappe aux auteurs¹⁸) ; d'autre part la température de ce bord est uniforme, et augmente avec le temps (donc la zone centrale doit s'échauffer à son contact ... mais si elle le fait, il doit y avoir un flux entrant...).

En fait, cette « cape » *inclut implicitement un isolant parfait*¹⁹, qui est le rêve impossible de tout thermicien : sa propriété de « protection thermique » vient de là, aucune réalisation pratique ne permettra de la retrouver.

C'est là qu'est l'erreur originelle commise par les auteurs : ils croient que leur déformation de l'espace, qui permet d'en rendre une zone indiscernable, a pour *conséquence* que cette zone est isolée thermiquement. Mais cette isolation parfaite n'est pas un heureux effet collatéral de la transformation géométrique réalisée ; c'en est une *condition préalable nécessaire*, cachée dans la complexité du raisonnement mathématique.

La cape théorique définie dans [1] fait appel à un isolant thermique parfait, qui n'existe pas.

12 Le lien fait ici n'est peut-être pas évident pour qui ne connaît pas la thermique. L'intégration de l'équation de la chaleur sur la zone centrale permet de relier le flux de chaleur total entrant dans cette zone à la variation de la température de cette zone. Si elle est plus rapide, c'est que le flux total est plus important. C'est donc vrai pendant le transitoire. Au delà, le flux total est nul (la température est stabilisée), car les flux entrant par la gauche et sortant par la droite de la zone centrale s'équilibrent, mais ils sont tous les 2 supérieurs pour le multicouche.

13 [1], §4.2 « In a first step, we normalise the homogenized conductivity κ_{hom} by ρc , what we call anisotropic homogeneous diffusivity $K_{hom} = \kappa_{hom}/\rho c$. This approach enables us to consider layers of diffusivities $K_A = \kappa_A/(\rho_A c_A)$ and $K_B = \kappa_B/(\rho_B c_B)$, what simplifies the numerical implementation ».

14 [4] : « une équipe de l'IEMN à Lille a effectué des premiers travaux. Nous sommes très enthousiastes. L'idée est originale et prometteuse, clame Nathalie Rolland. Dans son laboratoire spécialisé en usinage au micromètre près, on a commencé à découper du cuivre, du silicium, des polymères pour réaliser les premiers prototypes de bouclier thermique et de concentrateur. ». [6] : « Nous avons trouvé les bons matériaux, et l'usinage est en cours à l'Université de Lille ».

15 [1], §3.1, « However, the invisibility region (inner disc) displays a specific protection for heat, as the field is constant there. (...) Moreover, the constant value is allowed to vary with time ».

16 Dans les cas « réels » que nous calculons, la zone centrale n'est pas rigoureusement isotherme, l'écart des valeurs extrêmes (dans cette zone) de la température normalisée est simplement petit devant 1.

17 [1], §3.1 : « This means that by continuity, the flux (...) should also vanish there ».

18 [1], §3.1 : « It is therefore natural to have a constant temperature inside the invisibility region. Moreover, the constant value is allowed to vary with time, (...) ».

19 La conductivité thermique dans la direction radiale est en effet nulle pour $r'=R_i$ ([1], Eq. 12, à gauche). Si cette surface isolante parfaite existait, il ne serait nullement nécessaire de recourir à une cape compliquée pour réaliser une protection thermique exceptionnelle. Dans leur simulation numérique de la cape théorique avec Comsol (Fig. 2), les auteurs auraient dû exclure la zone centrale, où la solution est connue (température normalisée nulle dans tout le cercle, quel que soit l'instant) en imposant une condition de Neumann sur la frontière interne de la cape.

7/ Conclusion

L'article [1] repose en partie sur des erreurs d'interprétation, peut-être liées au domaine d'origine du concept de « cape d'invisibilité » : l'optique. En thermique, le flux de chaleur n'est pas la seule grandeur importante. Il y a aussi la température, qui, elle, n'a pas d'équivalent en optique. Ce n'est pas parce que (qualitativement) le flux thermique *semble* contourner un objet et que cet objet *semble* isotherme, que celui-ci est « protégé de la chaleur », qu'il ne s'échauffe pas, ou ne s'est pas échauffé, comme nous l'avons montré (quantitativement) plus haut dans ce texte²⁰.

Il nous faut encore donner quelques précisions sur le concept d'invisibilité en thermique.

La seule propriété remarquable (qui demeure après nos remarques) de la structure proposée par les auteurs, c'est que le flux de chaleur obtenu avec leur structure n'est que très peu perturbé en dehors du disque (donc « vu » de l'extérieur) par rapport au flux unidirectionnel qui serait obtenu avec un milieu entièrement homogène. C'est ce qu'on constate sur la figure 4 de [1], où les lignes isothermes restent presque²¹ parallèles en dehors du disque, y compris dans la situation correspondant à leur « réalisation ».

Mais il faut bien comprendre que « vu » doit être pris ici au sens d'une expérience de conduction thermique, absolument pas au sens d'une vision thermique de type infra-rouges : *par des expériences de conduction thermique*²², il sera difficile de *discerner* si un objet est ou non caché dans l'épaisseur de la structure. Qu'il soit *indiscernable* de ce point de vue ne permet pas de conclure que l'objet caché sera *invisible* par les techniques habituellement utilisées en imagerie thermique²³, car sa température reste différente de celle du milieu dans lequel il est placé, il va donc rayonner de manière spécifique²⁴.

Il y aurait enfin des commentaires à faire sur une autre partie de l'article ([1], §3.2), qui propose un concentrateur de flux thermique. Disons simplement que, à nouveau, on fait mieux avec des solutions traditionnelles plus simples, et que le lien fait avec des applications photovoltaïque est pour le moins obscur²⁵.

Au final, il ne reste donc rien des applications potentielles promises par les auteurs.

Remerciements.

Nous remercions Yvon Jarny, Professeur Émérite à Polytech'Nantes et membre du Laboratoire de thermocinétique de Nantes (CNRS UMR6607), qui nous a fait part de sa « stupéfaction » à la lecture de l'article [1]. Son soutien clair nous a été précieux. Nous le remercions également pour ses utiles conseils de rédaction.

Nous remercions la société Cedrat pour la mise à disposition du logiciel Flux®.

Références.

- [1] **Optics Express**, Vol. 20, Issue 7, pp. 8207-8218 (2012) - <http://dx.doi.org/10.1364/OE.20.008207>
- [2] **PhysicsWorld.com** (22/02/2012) : « Invisibility cloaking goes thermodynamic » - <http://physicsworld.com/cws/article/news/2012/feb/22/invisibility-cloaking-goes-thermodynamic>
- [3] **BBC News** : Science & Environment, 27/03/12 - <http://www.bbc.co.uk/news/science-environment-17518210>
- [4] **Le Monde** (25/02/2012 : « L'art de rendre invisible la chaleur ». <http://www.fresnel.fr/spip/spip.php?article788>
- [5] **Le Point** (05/04/2012 : « L'invisibilité n'est plus de la science-fiction » http://www.lepoint.fr/grands-entretiens/l-invisibilite-n-est-plus-de-la-science-fiction-05-04-2012-1449171_326.php
- [6] **Sciences et Avenir** (04/2012, p. 24 : « Un dispositif pour canaliser la chaleur » - <http://www.fresnel.fr/spip/spip.php?article803>
- [7] **Der Spiegel** (28/03/2012) : « Tarnkappe verbirgt Objekte vor Wärmestrahlung » (Une cape d'invisibilité qui protège les objets du rayonnement de chaleur) - <http://www.spiegel.de/wissenschaft/technik/tarnkappe-verbirgt-objekte-vor-waermestrahlung-a-824235.html>
- [8] **La Recherche** (02/2012, p. 46 et suivantes : « Déformer les ondes pour mieux les contrôler »
- [9] **The Economist**, 6/3/2012 « Heat-stroke of genius », <http://www.economist.com/blogs/babbage/2012/03/thermodynamics>
- [10] **Le Journal du CNRS** n°266, p. 11. <http://www.cnrs.fr/fr/pdf/jdc/266/index.html>

20 et comme le montrent aussi les auteurs dans [1], pour la cape théorique (avec les erreurs que nous avons soulignées) mais surtout pour la réalisation qu'ils en proposent (Fig. 4), mais sans en prendre acte et remettre en cause leurs propres conclusions.

21 Il faudrait, là aussi, que les auteurs fassent l'effort d'aller au-delà du qualitatif, et quantifient clairement l'écart entre le résultat théorique et celui de la réalisation proposée (ce n'est par exemple pas difficile de tracer l'écart des flux thermiques, ou son module ...).

22 expériences qui consisteraient à mesurer (ou visualiser) l'évolution temporelle des distributions du *flux de chaleur* sur les 2 limites extérieures ; mais comment faire cela, surtout s'il faut en plus le faire à distance ?

23 contrairement à ce qu'affirme BBC News [3] « The applications for the idea, outlined in Optics Express, stretch beyond hiding from thermal-imaging devices. » ou PhysicsWorld.com [2] qui cite directement l'un des auteurs : « At larger scales another possible application, says Guenneau, is shielding objects from thermal-imaging cameras (...) ».

24 Précisons que l'imagerie infra-rouge donne une image directe des *températures* des objets, au travers le leur rayonnement infra-rouge, et pas du *flux de chaleur de conduction*, contrairement à ce qu'on risque de comprendre dans [2] en raison du contexte de l'interview : « Testing the devices will then involve placing them next to a 500- μ m-long resistor and imaging the resulting distribution of heat flux using a thermal camera. »

25 [1], §3.2 : « Such a concentrator could be used to focus heat in a tiny region, what might have potential applications in photovoltaics ».